

# 基于光路复用机理的激光近程动态测距概率分布

甘霖\*, 张合\*\*

南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094

**摘要** 基于光路复用机理, 提出了一种激光近程动态扫描探测方法。基于重尾函数建立了一种脉冲激光发射波形数学模型, 推导了脉冲激光近程动态探测冲击响应及回波方程。建立了一种脉冲激光测距概率统计分布模型, 研究了脉冲激光发射功率/脉宽、阈值检测电压、等效均方根噪声电压以及激光出射角对测距概率分布的影响机理。结果表明: 随着发射功率的增加, 测距精度提高且分布曲线逐渐偏离真实值; 测距精度随着激光发射脉宽的增加而递减; 随着阈值电压的提高, 分布曲线向右移动; 距离测量分布曲线随着等效均方根噪声电压的增加而宽度增加、幅值减小; 随着激光出射角度的增加, 测距分布曲线向右移动, 测距精度随之降低。

**关键词** 激光光学; 脉冲激光; 近程探测; 动态测距; 光路复用; 概率密度分布

中图分类号 TJ43

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1104006

## Probability Distribution of Laser Short-Range Dynamic Ranging Based on Optical Multiplexing Mechanism

Gan Lin\*, Zhang He\*\*

ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** A laser short-range dynamic scan detection method is proposed based on the optical-multiplexing mechanism. Based on the heavy-tail function, a mathematical model of pulsed laser emission waveforms is established, and the shock responses and the echo equation in the pulsed laser short-range dynamic detection are deduced. A statistical probability distribution model of the pulsed laser ranging is established, and the influence mechanisms of the pulsed laser emission power, pulse width, threshold detection voltage, equivalent root-mean-square (RMS) noise voltage, and the laser exit angle on the probability distribution of the ranging are studied. The results show that, the ranging precision increases and the distribution curve gradually deviates from its true value with the increase of the laser emission power. The ranging precision decreases progressively as the laser emission pulse width increases. As the threshold voltage increases, the distribution curve shifts to the right. As for the distance measurement distribution curve, its width increases and its amplitude decreases with the increase of the equivalent RMS noise voltage. The ranging distribution curve shifts to the right and the ranging precision decreases as the laser exit angle increases.

**Key words** laser optics; pulsed laser; short-range detection; dynamic ranging; optical multiplexing; probability density distribution

**OCIS codes** 140.3538; 140.3460; 120.3620

## 1 引言

激光方向性好、抗干扰能力强、测距精度高<sup>[1-2]</sup>, 在多种弹药近炸引信中得到广泛应用<sup>[3-4]</sup>。然而, 现

代战场环境多变, 美国提出采用“硬杀伤”方式改变传统被动防御体系<sup>[5]</sup>。另外, 为提高战斗部毁伤效率<sup>[6-8]</sup>, 定向聚能起爆技术也是近年研究热点之一<sup>[9-10]</sup>。因此, 激光近炸引信在原有静态测距基础

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-21; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51605227)、中央高校基本科研业务费专项资金(NUST30915011303)

\* E-mail: kg568605@163.com; \*\* E-mail: hezhangz@mail.njust.edu.cn

上,须具备全向动态探测的能力。

针对激光全向动态探测问题,文献[4,11]提出采用多窗口方法,然而该方法中光学探测窗口和光电传感器数量众多,系统功耗高,稳定性低<sup>[12]</sup>。文献[13-14]采用双向电机驱动激光同步扫描,从而实现目标周向探测,该方法使用双向电机,体积大,空间布局复杂。在激光同步扫描探测机制基础上,文献[15]重点研究了激光频率和扫描速度等因素对目标捕获率的影响,但没有涉及距离测量精度问题。文献[1]基于高斯函数推导了激光脉冲响应和回波方程,研究了距离测量概率密度分布特性的影响因素,但是忽略了高斯函数和脉冲激光发射波形匹配问题。

本文针对激光近程全向动态探测问题,在前期

激光全向扫描探测方法的研究基础上<sup>[16-17]</sup>,提出一种基于光路复用机理的激光近程动态扫描探测方法。基于重尾函数建立了脉冲激光发射波形数学模型,推导了脉冲激光近程动态探测冲击响应及回波方程,建立了脉冲激光测距概率统计分布模型,研究了脉冲激光发射功率、激光发射脉宽、阈值检测电压、等效均方根噪声电压以及激光出射角对测距概率分布的影响机理。

## 2 基于光路复用机理的激光近程动态扫描探测方法

基于光路复用机理的激光近程动态扫描探测原理如图1所示。系统主要由激光近程探测系统、动态扫描系统以及光学系统构成。

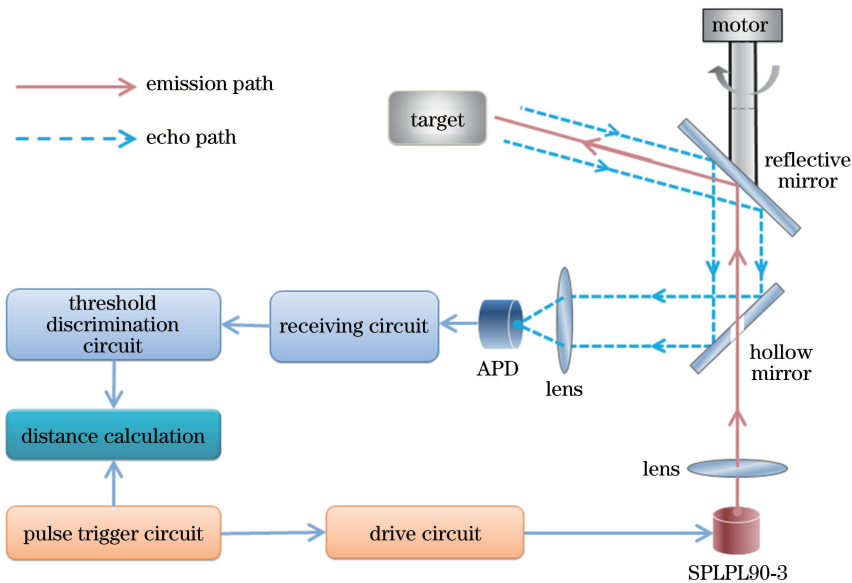


图1 基于光路复用机理的激光近程动态探测原理

Fig. 1 Principle of laser short-range dynamic detection based on optical multiplexing mechanism

激光近程动态扫描探测原理:脉冲激光发射电路点亮激光器(SPLPL90-3型,OSRAM,德国),触发信号同时作为测距起始信号,原始激光束经光学发射准直非球面透镜准直后,穿过中空全反镜到达全反平面镜,经全反平面镜反射后透过环形透光窗口出射,电机驱动全反镜周期扫描从而形成空间全向激光探测场;目标漫反射回波信号同样透过环形透光窗口到达全反平面镜,再由中空全反镜反射后被非球面聚焦透镜收集会聚至雪崩光电二极管(APD);经过光电转化以及时刻鉴别等一系列处理后,结合测距起始信号解算目标距离信息。

## 3 基于重尾函数的脉冲激光近程动态探测回波特征分析

### 3.1 脉冲激光发射波形数学建模

激光发射波形采用重尾函数表示,因为与高斯函数和倒置抛物线表示方法相比,重尾函数能更加精确地体现激光发射脉冲的波形特征<sup>[15]</sup>,其时空分布为

$$f(t) = (t/\tau)^2 \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

式中 $\tau$ 为激光发射脉宽。以重尾函数表示的不同脉宽激光发射波形如图2所示,可见脉冲波形具备较快的上升沿和较慢的下降沿,与实际激光脉冲波形特征相类似。

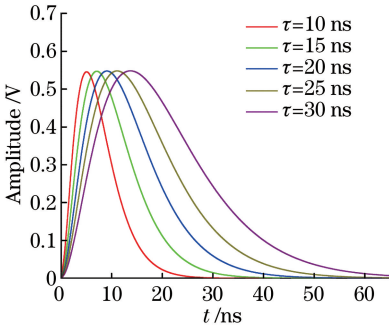


图 2 基于重尾函数的不同脉宽激光发射波形

Fig. 2 Laser emission waveforms with different pulse widths based on heavy-tail function

脉冲半导体激光器出射光束通常以高斯函数表示,其光强分布<sup>[1]</sup>为

$$g(s) = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 \{1 + [\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)]^2\}} \times \exp\left\{ \frac{-2s^2}{\omega_0^2 \{1 + [\lambda d_0 / (\pi\omega_0^2)]^2\}} \right\}, \quad (2)$$

式中  $P$  为激光总功率;  $\omega_0$  为位于光源处的激光光束束腰半径,  $\omega_0 = 2\lambda / (\pi\phi)$ ,  $\phi$  为激光束的发散角,  $\lambda$  为激光波长;  $d_0$  为探测系统和目标间距;  $s$  为光束中心与其横截面上的点的距离。

### 3.2 脉冲激光近程动态探测冲击响应及回波方程

发射激光束照射到目标上,回波特征与被探测目标表面特性有关,可用脉冲冲击响应函数  $h(t)$  表示,即

$$h(t) = 4\pi\rho(\alpha)g(s)\delta(t - 2d/c), \quad (3)$$

式中  $\rho(\alpha)$  为被探测目标单位面元的双向反射分布函数,  $d$  为该单位面元与测量系统间距,  $\delta(\cdot)$  为冲激函数(狄拉克函数),  $c$  为光速。  $\rho(\alpha)$  可表示为

$$\rho(\alpha) = \frac{A}{\cos^6\alpha} \exp(-\tan^2\alpha/\xi^2) + B \cos^m\alpha, \quad (4)$$

式中等号右边第一项为镜面反射部分,第二项为漫反射部分,  $A$ 、 $B$  分别表示两部分的反射幅度,  $\alpha$  为入射角,  $\xi$  为漫反射系数。被照射单位面元与测量系统间距  $d$  可由图 3 所示模型描述,光斑中心标记为  $M$ ,其横坐标为  $x_M$ ,则  $d$  可表示为

$$d = x_M / \cos\gamma, \quad (5)$$

将(2)、(4)、(5)式代入(3)式,得到的脉冲冲击响应函数  $h(t)$  为

$$h(t) = \frac{2\sqrt{2\pi}\rho(\alpha)Pc\cos\gamma}{\omega_0\sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}} \times \exp\left\{ - \left\{ \frac{ct\cos\gamma}{\sqrt{2}\omega_0\sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}} \right\}^2 \right\}. \quad (6)$$

通过设置不同脉冲激光发散角和激光出射角,

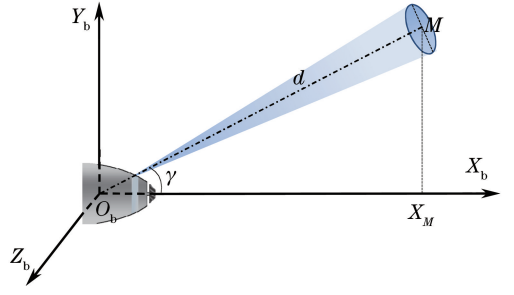


图 3 被照射单位面元和测量系统间距模型

Fig. 3 Model of distance between irradiation unit cell and measurement system

研究不同条件下的脉冲激光冲击响应特性。相关参数设置见表 1,不同脉冲激光发散角和激光出射角下脉冲冲击响应曲线分别如图 4(a)、(b)所示。可见随着激光发散角的增加,脉冲冲击响应曲线上沿变缓,峰值降低且拖尾效应增加;而脉冲冲击响应曲线会随着激光出射角的增加而展宽。

表 1 理论仿真及实验参数

Table 1 Parameters for theoretical simulation and experiment

Parameter	Value	Parameter	Value
$A$	0.0792	$\xi$	1
$B$	0.1286	$\lambda$ / nm	905
$\alpha$	0.1932	$d_0$ / m	15
$P$ / W	14	$c$ / (m · s <sup>-1</sup> )	3 × 10 <sup>8</sup>
$\gamma$ / (°)	10-50	$\phi$ / mrad	15-55

发射脉冲和脉冲冲击响应决定了回波波形<sup>[18]</sup>,脉冲激光回波  $j(t)$  可表示为

$$j(t) = f(t) \otimes h(t), \quad (7)$$

即

$$j(t) = \frac{2\sqrt{2\pi}\rho(\alpha)Pc\cos\gamma}{\omega_0\sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{ - \left\{ \frac{c\tau\cos\gamma}{\sqrt{2}\omega_0\sqrt{1 + [\lambda d / (\pi\omega_0^2)]^2}} \right\}^2 \right\} \cdot \left( \frac{t - \tau}{\tau_0} \right)^2 \cdot \exp\left( - \frac{t - \tau}{\tau_0} \right) \cdot d\tau. \quad (8)$$

## 4 脉冲激光近程动态测距概率分布

### 4.1 脉冲激光测距概率分布模型

所提出的基于光路复用机理的激光近程动态探测系统的接收机噪声包括背景噪声和相关电路噪声,其概率分布一般以高斯分布表示<sup>[19]</sup>,即

$$\rho(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left( - \frac{V_n^2}{2\sigma^2} \right), \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为等效均方根噪声电压,  $V_n$  是接收电路噪声电压。因此,掺杂了噪声信号的回波信号概率分布

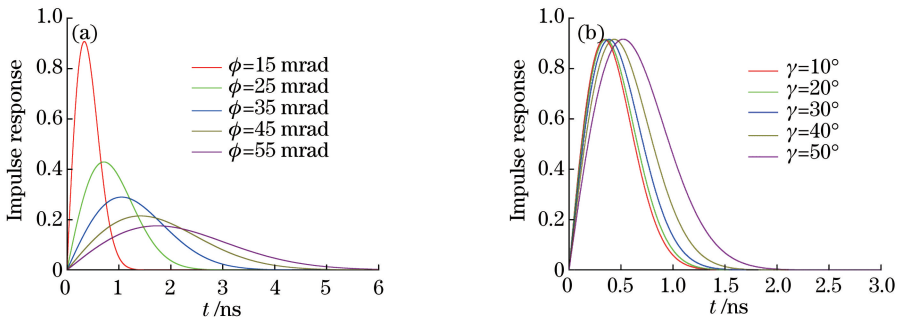


图 4 不同条件下的脉冲激光冲击响应。(a)不同脉冲激光发散角;(b)不同激光出射角

Fig. 4 Shock responses of pulsed laser under different conditions. (a) Different divergence angles of pulsed laser; (b) different laser exit angles

可以表示为

$$\rho(V_{sn}) = \rho[V_n + j(t)]. \quad (10)$$

采用最常用的阈值检测法作为回波时刻鉴别方法,则在任意时刻  $t$  之前的目标探测概率可表示为

$$P(t, V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} \rho[V_n + j(t)] \cdot dV_{sn}, \quad (11)$$

式中  $V_{th}$  为阈值检测电压。(11)式经推导后可变成

$$P(t) = \rho[V_{th} - j(t)] \cdot j'(t), \quad (12)$$

将  $t = 2r/c$  代入(12)式可得系统测距概率密度分布为

$$P(r) = \rho[V_{th} - j(r)] \cdot j'(r) \cdot \frac{2}{c}, \quad (13)$$

式中  $r$  为探测系统与目标之间的距离。

#### 4.2 脉冲激光发射功率对测距概率分布的影响

脉冲激光发射功率直接影响回波信号的幅值,从而影响回波信号上升沿斜率,而这里采用的阈值检测方法与被检测点的斜率密切相关。这里研究激光方位探测系统的测量精度与脉冲激光发射功率的内在关系。阈值检测电压设置为 300 mV,激光发射脉宽为 10 ns,等效均方根噪声电压设置为 30 mV,激光出射角为 30°,发射功率从 10 W 增加至 18 W,步长为 2 W,不同脉冲激光发射功率下的回波波形和距离测量概率分布分别如图 5、6 所示。随着发射幅值的增加,回波信号幅值也升高,距离测量概率分布方差减小且概率曲线逐渐向左偏离真实值。其原因为阈值检测点的曲线随着回波幅值的增加而变陡,导致检测点的被测时间减小,从而距离测量结果向左偏移。

#### 4.3 激光发射脉宽对测距概率分布的影响

激光发射脉宽同样会影响阈值检测点斜率,从而影响测距精度。下面分析测距分布与激光发射脉宽之间的关系。发射功率设置为 14 W,脉宽从 6 ns 增加至 14 ns,步长为 2 ns,其余参数与 4.2 节一致。

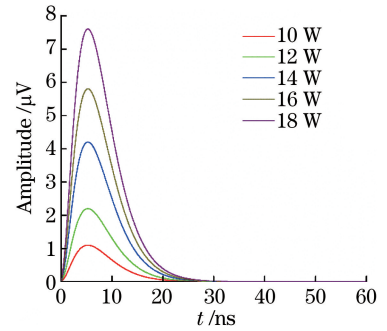


图 5 不同激光发射功率下的回波波形  
Fig. 5 Echo waveforms under different laser emission powers

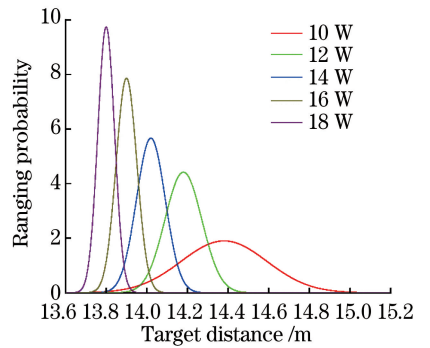


图 6 不同激光发射功率下的测距概率分布  
Fig. 6 Ranging probability distributions under different laser emission powers

不同激光发射脉宽下的激光回波波形和测距概率分布分别如图 7、8 所示。随着发射脉宽的增加,回波脉宽也会相应增加,且测距概率分布脉宽会随之增加,峰值随之降低,测距分布变得愈发分散,即测距精度随着激光发射脉宽的增加而降低。

#### 4.4 阈值检测电压对测距概率分布的影响

采用阈值检测法获取目标距离信息,接下来研究阈值电压对测距精度的影响。将发射功率设置为 14 W,阈值检测电压从 100 mV 增加到 500 mV,步



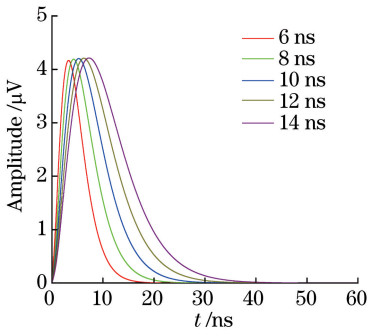


图 7 不同激光发射脉宽下的回波波形  
Fig. 7 Echo waveforms under different laser emission pulse widths

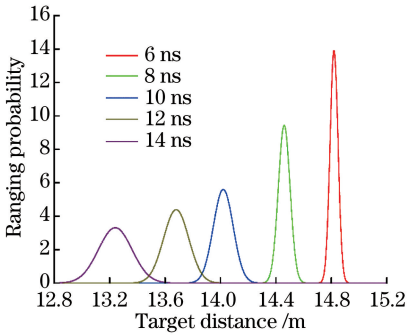


图 8 不同激光发射脉宽下的测距概率分布  
Fig. 8 Ranging probability distributions under different laser emission pulse widths

长 100 mV,其余参数与第 4.2 节相同。不同阈值检测电压下的测距概率分布如图 9 所示。当阈值电压在 100 mV 时,测距分布曲线呈缓慢的上升沿和陡峭的下降沿分布;随着阈值的提高,分布曲线呈正态分布,且脉宽逐渐减小;在阈值电压达到 300 mV 时,测距分布曲线脉宽最小,幅值达到最高。随着阈值的继续增加,分布曲线幅值降低,脉宽减小,当阈值电压为 500 mV 时,测距分布曲线呈陡峭的上升沿和缓慢的下降沿分布,测距精度随之降低。随着阈值电压的升高,测距分布曲线向右侧移动。

#### 4.5 等效均方根噪声电压对测距概率分布的影响

前节理论分析表明等效均方根噪声电压会影响距离测量精度。将发射功率设置为 14 W,等效均方根噪声电压从 10 mV 增加到 50 mV,步长 10 mV,其余参数与第 4.2 节相同。不同等效均方根噪声电压下的测距概率分布如图 10 所示。随着等效均方根噪声电压的增加,脉冲激光探测系统的距离测量分布曲线的脉宽增加、幅值减小,曲线不会移动,因此,距离测量精度会随着等效均方根噪声电压的增加而降低。

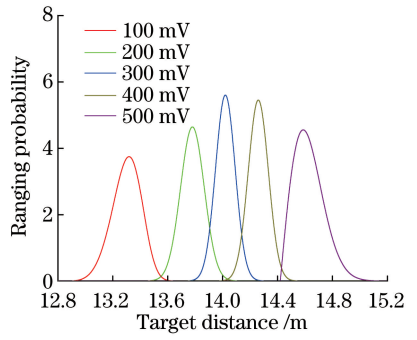


图 9 不同阈值电压下的测距概率分布  
Fig. 9 Ranging probability distributions under different threshold voltages

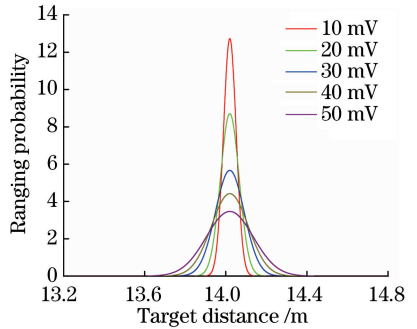


图 10 不同噪声电压下的测距概率分布  
Fig. 10 Ranging probability distributions under different noise voltages

#### 4.6 激光出射角对测距概率分布的影响

激光出射角度会影响脉冲冲击响应,从而影响激光回波信号。为考察激光出射角度对测距精度的影响,将发射功率设置为 14 W,激光出射角度从 10° 增加到 50°,步长 10°,其余参数与第 4.2 节相同。不同激光出射角度下的测距概率分布如图 11 所示。可见,随着激光出射角度的增加,测距分布曲线逐渐向右移动,同时分布曲线的脉宽增加,幅值降低,即测距精度随着出射角度的增大而降低。

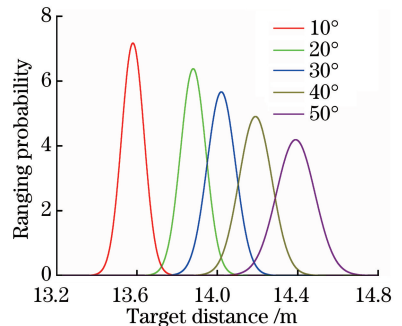


图 11 不同激光出射角度下的测距概率分布  
Fig. 11 Ranging probability distributions under different laser exit angles

## 5 结 论

针对激光近程全向动态探测问题,提出了一种光路复用方法以实现激光近程动态扫描探测。在脉冲激光发射模型基础上,推导了脉冲激光近程动态探测冲击响应及回波方程,建立了脉冲激光测距概率统计分布模型,研究了测距概率分布的影响机理,得到以下结论。

- 1) 随着发射功率的增加,距离测量概率分布方差减小且概率曲线逐渐偏离真实值。
- 2) 测距精度随着激光发射脉宽的增加而降低。
- 3) 随着阈值的增加,分布曲线呈现正态分布,且脉宽逐渐减小;随着阈值的继续增加,分布曲线幅值降低,脉宽减小,当阈值电压为 500 mV 时,测距分布曲线呈陡峭的上升沿和缓慢的下降沿分布,测距精度随之降低,且分布曲线向右侧移动。
- 4) 距离测量精度随等效均方根噪声电压的增加而降低。
- 5) 随着激光出射角度的增加,测距分布曲线向右移动,同时分布曲线的脉宽增加,幅值降低,测距精度随之降低。

## 参 考 文 献

- [1] Xu X B, Zhang H, Zhang X J, *et al.* Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 210601.  
徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响 [J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 210601.
- [2] Guo J, Zhang H, Wang X F. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0113001.  
郭婧, 张合, 王晓锋. 激光引信在降雨中的光束扩展特性 [J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0113001.
- [3] Gan L, Zhang H. Evaluation of a novel integrated laser fuze receiving system [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(6): 1-8.
- [4] Tan Y, Zhang H, Zha B. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using range-gated receiver and adaptive filter [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(16): 1648-1656.
- [5] Chen J J. Emerging hard kill capabilities in torpedo defence systems [J]. *Technical Acoustics*, 2013(5): 439-444.  
陈敬军. 鱼雷防御系统中不断出现的硬杀伤能力 [J]. *声学技术*, 2013(5): 439-444.

- [6] Shin Y S. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion [J]. *Computers & Structures*, 2004, 82(23/24/25/26): 2211-2219.
- [7] Kalavalapally R, Penmetsa R, Grandhi R. Configuration design of a lightweight torpedo subjected to an underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 343-351.
- [8] Kim J H, Shin H C. Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygentank [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(8/9): 812-822.
- [9] Ten X, Mi S S. Status quo analysis and development of directional warhead [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014(4): 89-94.  
滕玺, 米双山. 定向战斗部的现状分析与发展 [J]. *飞航导弹*, 2014(4): 89-94.
- [10] Qian D, Zhang Q. Development of anti-torpedo torpedo in Europe [J]. *Torpedo Technology*, 2006, 14(5): 1-5.  
钱东, 张起. 欧洲反鱼雷鱼雷研发展望 [J]. *鱼雷技术*, 2006, 14(5): 1-5.
- [11] Xu X B, Zhang H. Pulsed laser detection azimuth magneto-electric detection technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0114003.  
徐孝彬, 张合. 脉冲激光探测方位角磁电检测技术 [J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0114003.
- [12] Cui G P. Foreign anti-torpedo torpedo development and trend analysis [J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(3): 138-141.  
崔贵平. 国外反鱼雷鱼雷技术发展及趋势 [J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(3): 138-141.
- [13] Xu X B, Zhang H. Optimal pulsed frequency and scanning speed of laser circumferential detection system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0508002.  
徐孝彬, 张合. 激光周向探测系统最佳脉冲频率与扫描转速 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0508002.
- [14] Tan Y Y, Zhang H, Zha B T. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 111012.  
谭亚运, 张合, 查冰婷. 水中单光束扫描激光引信捕获率建模与仿真 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 111012.
- [15] Chen S S, Zhang H, Xu X B. Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0206001.  
陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2018,

- 47(2): 0206001.
- [16] Gan L, Zhang H, Zhang X J. Research on large FOV single transceiver bidirectional-driving detection technology for laser fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(8): 942-947.  
甘霖, 张合, 张祥金. 激光引信双向驱动单发单收大视场探测技术研究 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(8): 942-947.
- [17] Gan L, Zhang H, Zhang X J, *et al.* Single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 84-89.
- 甘霖, 张合, 张祥金, 等. 激光近炸引信单光束脉冲周向探测技术 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 84-89.
- [18] Grönwall C A, Steinvall O K, Gustafsson F, *et al.* Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106201.
- [19] Jiang H, Lai J, Wei Y, *et al.* Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45(1): 278-284.